Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo

Biochar and its potential uses in soils

Rocío García Montero[1*], Pablo Pizarro Medina[2*], Manuel Rodríguez Rastrero[1], María José Sierra Herráiz[1], María Guirado Torres[1], Rocío Millán Gómez[1*]

Resumen

La gestión de los residuos debe dirigirse hacia la economía circular, obteniendo el mayor aprovechamiento de recursos materiales y energéticos disponibles. Una alternativa de gestión es la producción de biochar a partir de residuos orgánicos. Su aplicación en los suelos puede generar un doble servicio ambiental: mejorar sus propiedades y como herramienta contra el cambio climático al incrementar su contenido en carbono. Parte de la investigación actual sobre biochar está centrada en su papel como enmienda y su potencial fertilizante. En este artículo se presenta una caracterización de distintos biocarbones procedentes de residuos del sector primario y la industria agroalimentaria de una determinada área geográfica, producidos en condiciones de alta temperatura. Los resultados muestran que la disponibilidad de una gran diversidad de residuos puede presentar un alto interés agrícola y ambiental, ya que la transformación de dichos residuos en biocarbones ofrece propiedades aprovechables en numerosos servicios ambientales.

Palabras clave

Caracterización de biocarbones, pirólisis, residuos orgánicos, enmiendas orgánicas.

Abstract

Waste management should be directed towards the circular economy, obtaining the best use of available material and energy resources. A management alternative is the production of biochars from organic waste. Its application in soils can produce a double environmental service: to improve soil properties and as a tool against climate change by increasing soil carbon content. Part of the current research on biofuels is focused on its role as an amendment and its potential fertilizer. This article presents a characterization of biochars from Primary Sector waste and the agri-food industry from a specific geographic area and produced under high temperature conditions. The results show how the availability of a great diversity of residues can present a high agricultural and environmental interest, since the transformation of these residues into biochars offers useful properties in relation to numerous environmental services.

Keywords

Biochar characterization, pyrolysis, organic wastes, organic amendments.

Recibido / *received*: 17/12/2020. Aceptado / *accepted*: 17/03/2021.

1. Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos. Departamento de Medio Ambiente. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). Avda. Complutense, 40. 28040 Madrid.
2. Green Oil Energy Systems SLP. Travesía de la Cruz Verde 2. 45002 Toledo.
*Autores para correspondencia. Rocío García Montero: Rocio.Garcia@ciemat.es; Pablo Pizarro Medina: pizarro.medina@gmail.com.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com



Foto: Shutterstock.

Introducción

El sector primario y la industria agroalimentaria son grandes productores de residuos, en su mayoría de naturaleza orgánica. Una deficiente gestión de estos puede ocasionar graves consecuencias ambientales, como contaminación de aguas y suelos, incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero e impacto paisajístico. Según la legislación vigente, el artículo 3 de la ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados, define, entre otros, el concepto de residuos como "cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar". Y residuos industriales, como "residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial".

Todas aquellas acciones que permitan incorporar estos residuos a la economía circular, contribuirán a reducir sus impactos ambientales. Dentro del concepto de valorización energética de los residuos, existe una alternativa en la que se puede combinar la obtención de rendimiento energético, en un contexto de bajas emisiones de gases de efecto invernadero, junto con un subproducto sólido con potencial de enmienda en el suelo: el biochar o biocarbón.

¿Qué es el biochar y cómo se produce?

El "biochar" o "biocarbón" (figura 1) es "un producto de carbonización de grano fino, que se obtiene a través de la pirólisis de biomasa y residuos biodegradables, y que está caracterizado por un alto contenido de carbono orgánico y una baja susceptibilidad a la degradación" (Saletnik *et al.*, 2019).

El proceso de pirólisis permite, en principio, que no haya limitaciones importantes en cuanto a la tipología

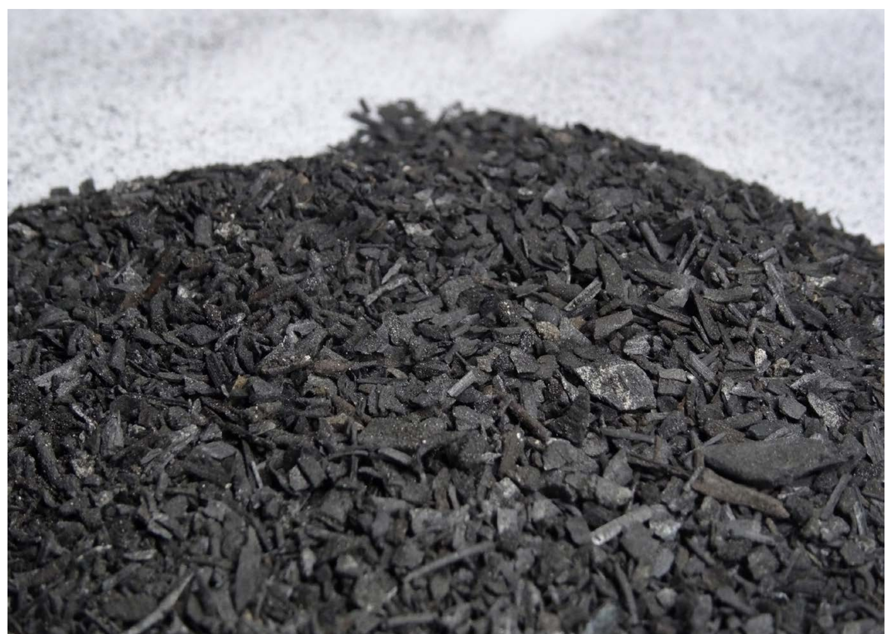


Figura 1. Biochar a tamaño <2 cm. Imagen: Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos. CIEMAT.

de residuo (incluye, por ejemplo, residuos plásticos), por lo que consigue una reducción importante del volumen de residuos con la transformación en tres componentes: líquido (bioaceite), sólido (biochar) y gaseoso (*syngas* o gas de síntesis), con posibilidad de retroalimentación energética y evitando o minimizando las emisiones de CO_2.

El proceso de pirólisis, junto con el secuestro de carbono en los suelos mediante la aplicación del biochar, puede resultar una estrategia conjunta (Turner, 1999) para ayudar a minimizar los efectos del cambio climático. De hecho, en el último informe del Intergovernmental Panel on Climate Change, se incorpora por primera vez el biochar como herramienta de mitigación por su capacidad de fijar carbono (IPCC, 2018).

Las propiedades del biochar resultante dependerán, por una parte, de la naturaleza de los materiales seleccionados, y por otra, de las condiciones del proceso de pirólisis.

A lo largo de estos últimos años se ha experimentado con numerosos tipos de residuos:-

- *Biomasa de tipo lignocelulósica*, compuesta por madera y restos de cultivos. Sus principales componentes son polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa, y polímeros fenólicos como las ligninas. Su composición general es muy variable, según especies vegetales, condiciones climáticas y del suelo (Brown, 2009). Las biomasas ricas en ligninas son las que presentan mayor resistencia al calentamiento y mayores rendimientos en la producción de biochar (Demirbas, 2004).
- *Otros residuos susceptibles de pirólisis* son los lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos (RSU), estiércoles, purines y otros residuos animales (SANDACH). Aunque el proceso de pirólisis sirve como proceso higienizante, es necesario testar y caracterizar bien para descartar cualquier problemática que pudiese ocasionar su aplicación. Por otro lado, son materias primas que pueden presentar una alta concentración de nutrientes para los cultivos (REC, 2014).

En cuanto a las condiciones de pirólisis, es importante considerar aspectos como la temperatura, el contenido en humedad del material o el tiempo de residencia. La duración del proceso y la temperatura alcanzada van a condicionar los rendimientos de los tres subproductos resultantes del proceso. Según aumenta la temperatura, el rendimiento se desplaza hacia la producción de gas, por lo que se reduce en la fracción líquida y sólida. Dependiendo del objetivo final, en los procesos de pirólisis a elevada temperatura (superior a 700 ºC), puede darse la oportunidad de obtener un gas con aprovechamiento energético y un biochar con múltiples usos.

Sobre las características que presenta el biochar, a medida que aumenta la temperatura del proceso de pirólisis, este incrementa su contenido relativo en carbono, aumenta el pH, la conductividad eléctrica y la abundancia en grupos funcionales básicos, mientras que se empobrece en hidrógeno y oxígeno, reduce sus rendimientos y los grupos funcionales ácidos (Al-Wabel *et al.*, 2013). Este aumento de temperatura es el que produce un reordenamiento en la estructura, incrementando la aromaticidad y, con ello, su estabilidad a lo largo del tiempo y su potencial en la captura de carbono (Hammes y Smith, 2009).

Biochar y sus aplicaciones ambientales

Son numerosos los usos conocidos que se le pueden dar a estos biocarbones hoy en día. Su estructura porosa y sus características químicas lo convierten en un material atractivo con el que trabajar a la hora de intentar solventar algunas problemáticas ambientales como: el tratamiento de aguas residuales o contaminadas, al usar el biochar como filtro y retener metales pesados o contaminantes químicos. De igual manera en chimeneas industriales para reducir las emisiones de gases contaminantes. En el sector ganadero, se ha incorporado en las camas de ganado y tratamiento de estiércoles como forma de reducir olores y facilitar su tratamiento (Schmidt, 2012). No obstante, el presente artículo se va a centrar en el papel del biochar en el suelo.

El uso del biochar en la mejora del suelo, junto con su aplicación en los cultivos, se viene estudiando con gran interés en las últimas décadas. Los orígenes del biocarbón, como enmienda orgánica, se datan de la época precolombina en la Amazonía brasileña, en unos suelos denominados *Terra Preta* (Tierra negra); su color y propiedades se atribuyen a la carbonización, principalmente de biomasa vegetal. Estos suelos presentan altas concentraciones de nutrientes y fertilidad en general muy superiores al de los suelos adyacentes, además de unas altas concentraciones de carbono muy estables con el paso del tiempo (Glaser *et al.*, 2001).

En el caso de suelos contaminados, las características químicas que presenten los distintos biocarbones van a determinar los mecanismos en los que puede ser útil su aplicación. De igual manera, la adición de biochar al suelo puede ocasionar cambios que beneficien su manejo, por factores como el pH que se pueden ver influidos.

Se pueden dar procesos de retención de metales por intercambio químico, fenómenos de sorción física y también puede favorecer modificaciones de las condiciones redox a microescala por los cambios producidos en la estructura física y porosa del suelo (Beesley *et al.*, 2015). Además, aquellos biocarbones que presentan un alto contenido en cenizas, pueden propiciar la precipitación de metales, ya que suele ir relacionada con una mayor concentración en sales minerales (Gaskin *et al.*, 2008).

En la agricultura (figura 2), el potencial del biochar viene dado por el aumento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, motivado por una mejora en la capacidad de intercambio catiónico (Liang *et al.*, 2006)de la estructura del suelo y la porosidad, lo que favorece el hábitat microbiano y, por tanto, aumenta la actividad biológica. También incrementa el agua disponible para las plantas (Diatta *et al.*, 2020)'. Y se obtienen beneficios ambientales como la reducción de sus dosis o se minimiza su pérdida por lixiviación (REC, 2014).

Con carácter general, los suelos agrícolas españoles, con valores de carbono orgánicos muy bajos, son buenos candidatos para la aplicación extensiva de biochar; se puede llegar a mejorar su fertilidad actual y potencial, y aumenta su capacidad como sumidero de carbono en el contexto de la lucha contra el cambio climático.

Los beneficios ambientales que se derivan de la aplicación de biochar al suelo no tienen valor específico de

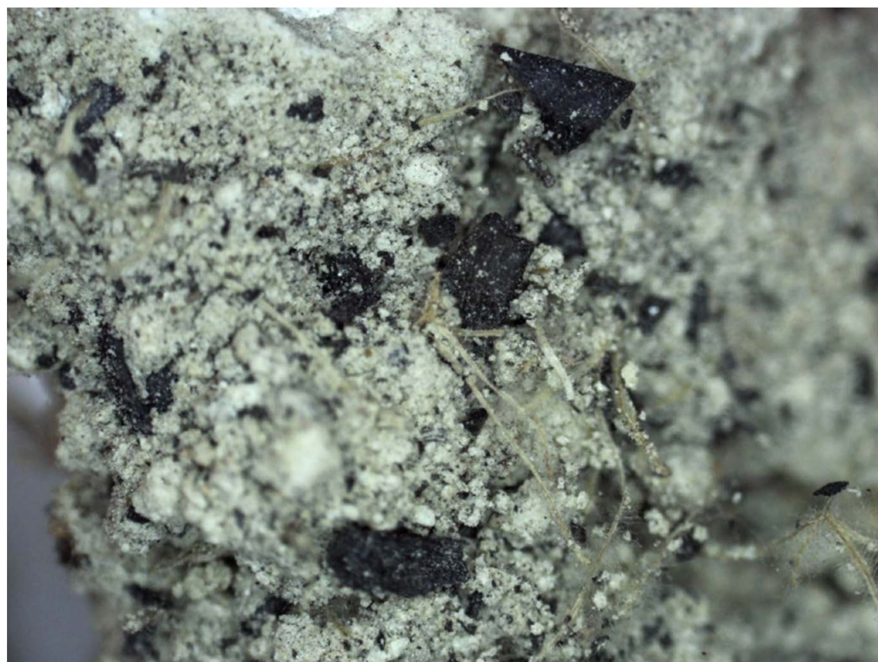


Figura 2. Biochar integrado en suelo agrícola degradado -15x. Imagen: Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos. CIEMAT.

mercado, para considerar el biochar una herramienta viable a gran escala, son necesarios incentivos regulatorios y financieros (Pourhashem *et al.*, 2018). Estos autores recomiendan la mejora de las políticas que permitan monetizar los beneficios ambientales y los costes evitados, el reconocimiento del suelo como un recurso a través de políticas de conservación y el desarrollo de un conjunto de estándares de productos aptos para la producción de biochar.

Actualmente, existe el Reglamento (UE) 2019/1009, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE, al que sería posible recurrir si el biochar se considerase enmienda orgánica. No obstante, no existe legislación nacional o europea en la que se incluya el biochar propiamente dicho, como enmienda o con otros usos, en los que se regulen estándares en su producción y valores límites de referencia en distintos parámetros. Sin embargo, su uso está mucho más extendido en otros países de la Unión Europea y Estados Unidos, donde han nacido distintas iniciativas que han generado de manera voluntaria estándares de producción propios a la espera de una regulación común (Meyer *et al.*, 2017). Por tanto, es necesario que continúe la investigación para tener el mayor conocimiento sobre este recurso y se regulen los criterios que permitan extender su uso bajo unas garantías ambientales y socioeconómicas.

Esta temática tan actual ha dado pie a la colaboración entre la Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del Departamento de Medio Ambiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la empresa *Green Oil Energy Systems SLP.*

El objetivo principal de esta investigación es mostrar cómo residuos muy heterogéneos procedentes de una reducida área geográfica, y sometidos a un proceso de pirólisis de alta temperatura, pueden presentar interés agrícola y/o ambiental. Se pretende, asimismo valorar hasta qué punto el proceso de pirólisis homogeniza las propiedades de los biocarbones obtenidos o, si, por el contrario, estos mantienen su heterogeneidad inicial. Estos objetivos implican analizar diversas propiedades físico-químicas, fitotóxicas y estructurales de estos biocarbones, y aplicar criterios estadísticos con objeto de evaluar sus potenciales usos, principalmente como enmienda edáfica, así como herramienta para incrementar el carbono orgánico de los suelos.

Metodología: tipos de residuos y proceso de pirólisis

La variable a estudio es el subproducto sólido obtenido según el residuo tratado. Las materias primas empleadas son de origen industrial agroalimentario, forestal, agrícola y ganadero. En el proceso de pirólisis se mantuvieron condiciones de alta temperatura (820 °C), con un alto rendimiento en la fracción gas.

Otro aspecto valorado a la hora de seleccionar los residuos es que estos procedieran de un entorno próximo al lugar en el que se vayan a tratar o emplear, en el contexto de una economía circular y local. En este caso, los residuos proceden de diversas actividades agrarias e industriales desarrolladas en el norte de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha (provincias de Toledo y Guadalajara).

Se han estudiado 10 residuos, cuyo origen y nomenclatura con la que se va a referir a cada uno de ellos, en adelante, se muestran a continuación:

- Residuos de olivicultura (**RO**).
- Residuos de industria oleícola (**ROF**).
- Residuo de plantas suculentas (**RC**).
- Residuos forestales (**RF**).
- Excretas ganaderas (**RE**).
- Residuos de cultivo cerealista de secano (**RA**).
- Residuos de cultivo cerealista de regadío (**RAL**).
- Residuos de la industria de cítricos (**RCI**).
- Residuo de planta de biomasa (**REN**).
- Residuo de vinicultura (**RV**).

En este estudio, ha sido empleado un prototipo de equipo de pirólisis diseñado y construido expresamente por Green Oil Energy Systems SLP, con objeto de desarrollar un tratamiento de residuos con fines energéticos, de bajo coste tecnológico y susceptible de autoalimentación por el gas de síntesis generado durante el propio proceso de pirólisis.

Las características básicas del equipo se muestran en la figura 3. Se trata de una tecnología modular que permite, en caso de ser requerido, su uso *in situ* en fábrica con una potencia eléctrica de 18 Kw. Los vapores evacuados son procesados adicionalmente para la condensación de bioaceites.

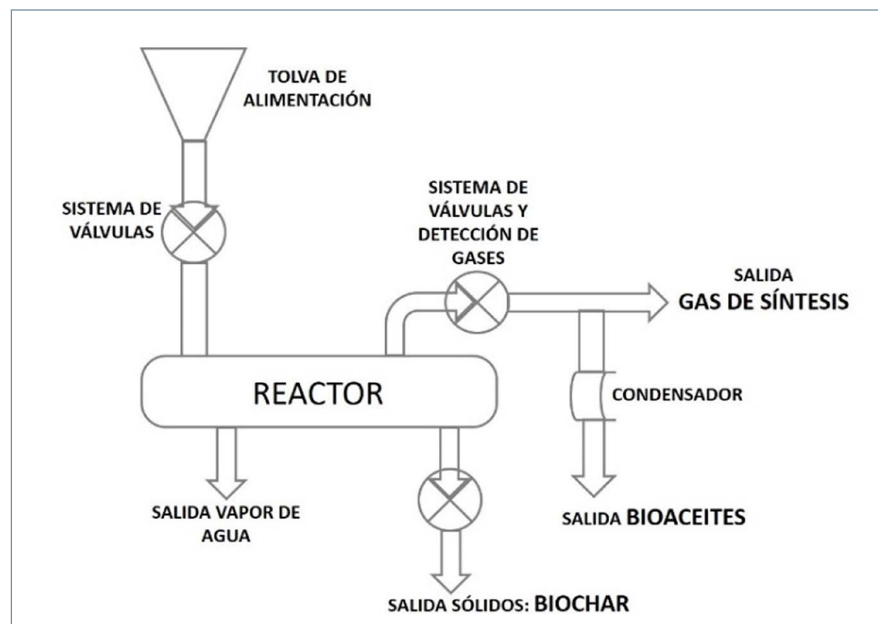


Figura 3. Esquema básico del equipo de pirólisis. Fuente: elaborado por GOES.



Figura 4. Prototipo del equipo modular de pirólisis empleado. Imagen tomada por GOES.

Previamente al proceso de pirólisis, los residuos fueron sometidos a un proceso de secado a 95 °C durante 2 horas. Además, aquellos que presentaban elementos de gran tamaño fueron fragmentados hasta conseguir un diámetro máximo de 2 cm. Los residuos fueron incorporados al reactor una vez alcanzados los 780 °C. La temperatura máxima del proceso fue de 820 °C, y el tiempo de residencia, de 1 hora. Una vez obtenido el biochar, se procedió a su enfriado y desodoración en vacío. La figura 4 muestra una imagen del prototipo empleado.

El biochar generado fue caracterizado en los laboratorios de la Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del CIEMAT.

Los análisis realizados incluyeron: pH (1:10 en agua), conductividad eléctrica (C.E.) (1:10), carbono orgánico fácilmente oxidable (Walkley-Black), silicio (Si) asimilable, fosfatos (método Burriel-Hernando), nitrógeno Kjeldahl, iones solubles, superficie específica (BET), carbono orgánico total (TOC), fitotoxicidad (test de Zucconi) y análisis de muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM). Dichos parámetros permiten evaluar la capacidad de los distintos productos en la recuperación de suelos degradados y la fijación de carbono.

Resultados y discusión

Análisis físico-químicos

Los resultados principales de estos análisis físico-químicos vienen recogidos en la Tabla 1. En primer lugar, se observa que todos ellos presentan un pH entre alcalino y fuertemente alcalino, como es propio en los biocarbones producidos a altas temperaturas (De Luca *et al.*, 2009). La conductividad, sin embargo, presenta unos valores mucho más variables, dado que el origen de la materia prima va a marcar la salinidad que presente el biochar resultante. Destaca el valor de RC, seguido de ROF, REN y RCI; esto se debe a la naturaleza de la especie vegetal o los tratamientos que hayan recibido en los procesos industriales.

El carbono orgánico fácilmente oxidable (C_{FO}), determina la forma de C relativamente lábil y accesible para los microorganismos. Los resultados vuelven a ser muy variables según la materia prima. Biocarbones como RC, RE, RA y ROF, procedentes de cultivos o excretas, son los que presentan los valores más altos. La excepción a esta categoría es RCI. Los valores más bajos provienen de aquellos de origen leñoso, con la singularidad de RF, con un valor superior al resto de similar origen.

En el caso del silicio, elemento de interés en la biofortificación de los cultivos, su presencia en los biocarbones está asociada al contenido en cenizas; su proporción aumentará con la temperatura de pirólisis (Brown, 2009). El Si asimilable presenta unos valores muy bajos en todos los biocarbones, con la posible excepción de ROF y RA. En el caso de ROF puede deberse a algún tratamiento propio de la industria. Sin embargo, el biochar RA, pro-

		pH	C.E ($mS \cdot cm^{-1}$)	C_{FQ} (%)	Si (%)	Fosfatos ($g \cdot kg^{-1}$)	N (%)	BET ($m^2 \cdot g^{-1}$)	TOC (%)
Biocarbones analizados	**RO**	9,4 *(0,22)	1,1 (0,33)	0,7 (0,1)	0,001	0,26 (0,02)	0,46 (0,03)	146,8	85,0 (1,41)
	ROF	9,3 (0,01)	19,5 (0,06)	1,8 (0,1)	0,031	0,13 (0,01)	1,34 (0,02)	2,0	64,3 (1,48)
	RC	10,7 (0,56)	69,9 (5,30)	6,9 (0,4)	0,003	8,39 (0,28)	0,85 (0,04)	4,6	27,9 (1,17)
	RF	8,4 0,01	0,8 (0,00)	2,9 (0,1)	0,001	2,64 (0,04)	0,62 (0,04)	7,8	37,6 (1,03)
	RE	10,1 (0,02)	2,2 (0,10)	5,8 (0,1)	0,004	4,84 (0,13)	0,82 (0,03)	22,9	29,1 (3,14)
	RA	10,0 (0,01)	5,0 (0,17)	4,0 (0,5)	0,026	1,40 (0,20)	1,38 (0,19)	45,2	66,3 (2,08)
	RAL	9,9 (0,08)	6,8 (0,69)	0,6 (0,1)	0,008	0,46 (0,05)	0,68 (0,06)	141,7	84,8 (0,30)
	RCI	10,1 (0,11)	9,1 (0,84)	1,0 (0,1)	0,001	0,43 (0,05)	1,19 (0,08)	34,8	77,2 (0,51)
	REN	11,9 (0,04)	11,4 (0,11)	1,0 (0,0)	0,004	2,93 (0,08)	3,11 (0,09)	6,1	52,1 (0,12)
	RV	9,8 (0,08)	1,9 (0,67)	0,9 (0,0)	0,001	1,33 (0,24)	0,60 (0,05)	209,2	83,4 (1,03)

Tabla 1. Parámetros físico-químicos de los biocarbones. *() Desviación estándar.

cedente de restos de cultivos de secano acumuladores de silicio, puede ser fuente de este elemento en los suelos en los que se aplique (Abbas *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018).

La presencia de sales en la materia prima, igualmente, determina el contenido en fosfato asimilable, de gran importancia en la fertilización de cultivos. En este sentido destacan biocarbones como RC y RE. Biocarbones procedentes de material herbáceo, hojas y frutos (ROF, RA, RCI) han presentado contenidos elevados en N. Sin embargo, en aquellos de naturaleza leñosa, los valores en N son previsiblemente bajos (Knicker, 2010). El elevado valor en N obtenido en el biocarbón producido a partir de residuos tratados en la planta de biomasa (REN) podría relacionarse con una diversidad de residuos tratados mayor de la esperada.

El potencial que puede presentar un biocarbón a la hora de retener líquidos, gases o como hábitat de microorganismos, se verá influido por su porosidad y la tipología de estos poros. La superficie correspondiente a los poros de menor tamaño, mesoporos (50-2 nm) y microporos (< 2 nm) (Downie *et al.*, 2009) puede relacionarse con la superficie específica (BET). Los biocarbones caracterizados presentan gran variabilidad; aquellos procedentes de origen leñoso son los que obtienen los valores más altos, junto con RAL, cultivo de regadío. La excepción de una baja superficie específica en los de origen leñoso es RF. A su vez, el resto de biocarbones también muestran valores reducidos; esto podría deberse a que altas temperaturas de pirólisis pueden provocar que parte de la estructura desaparezca, se colapse y, por tanto, se pierdan esos poros (Lua *et al.*, 2004).

Por último, la tabla 1 recoge los valores de carbono orgánico total, parámetro de interés al hacer referencia al potencial del biochar para el secuestro de C en los suelos. Las materias primas tienen de nuevo un papel determinante en este parámetro: aquellas procedentes de material leñoso presentan valores de TOC del 70-90%, y aquellos de origen más diverso, como restos de agricultura, excretas o lodos, presentan valores por debajo del 60% (Sohi *et al.*, 2009). Esta diferenciación por tipología de residuos se cumple mayoritariamente, a excepción de RF, con un valor muy por debajo de lo esperado, son de origen forestal, y de RAL y RCI, de origen agrícola de regadío y cítricos, con unos resultados superiores a lo previsto.

La tabla 2 muestra la concentración de iones solubles en el extracto acuoso de cada uno de los biocarbones.

Como se comentó respecto a la conductividad eléctrica, hay dos biocarbones que presentan una concentración en sales muy superior al resto, ROF y RC. En ellos destacan la concentración en iones cloruro (Cl^-) y potasio (K^+), probablemente relacionada con los procesos industriales a los que se someten los residuos oleícolas. En el caso de RC, las plantas

		Iones solubles								
		F^-	Cl^-	NO_2^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
		$mg \cdot g^{-1}$								
Biocarbones analizados	RO	0,06	0,10	0,02	0,09	0,30	0,23	1,51	0,04	0,18
	ROF	0,38	4,24	0,09	2,82	0,96	0,45	111,02	0,09	0,22
	RC	0,01	63,06	0,01	0,14	2,95	5,70	102,79	1,44	0,47
	RF	0,07	0,16	0,01	0,06	0,82	0,25	1,55	0,08	0,18
	RE	0,01	0,80	0,01	0,01	0,15	1,04	2,04	0,02	0,02
	RA	0,01	6,87	0,01	0,01	7,63	0,00	14,12	0,27	1,62
	RAL	0,12	2,55	0,03	0,09	0,28	0,34	8,90	0,11	0,13
	RCI	0,11	2,52	0,01	0,06	0,47	0,35	13,97	0,16	0,41
	REN	0,09	1,47	0,03	0,06	9,52	0,45	20,10	0,01	0,35
	RV	0,04	0,13	0,02	0,17	0,44	0,45	2,50	0,07	0,08

Tabla 2. Concentración de iones solubles en los biocarbones.

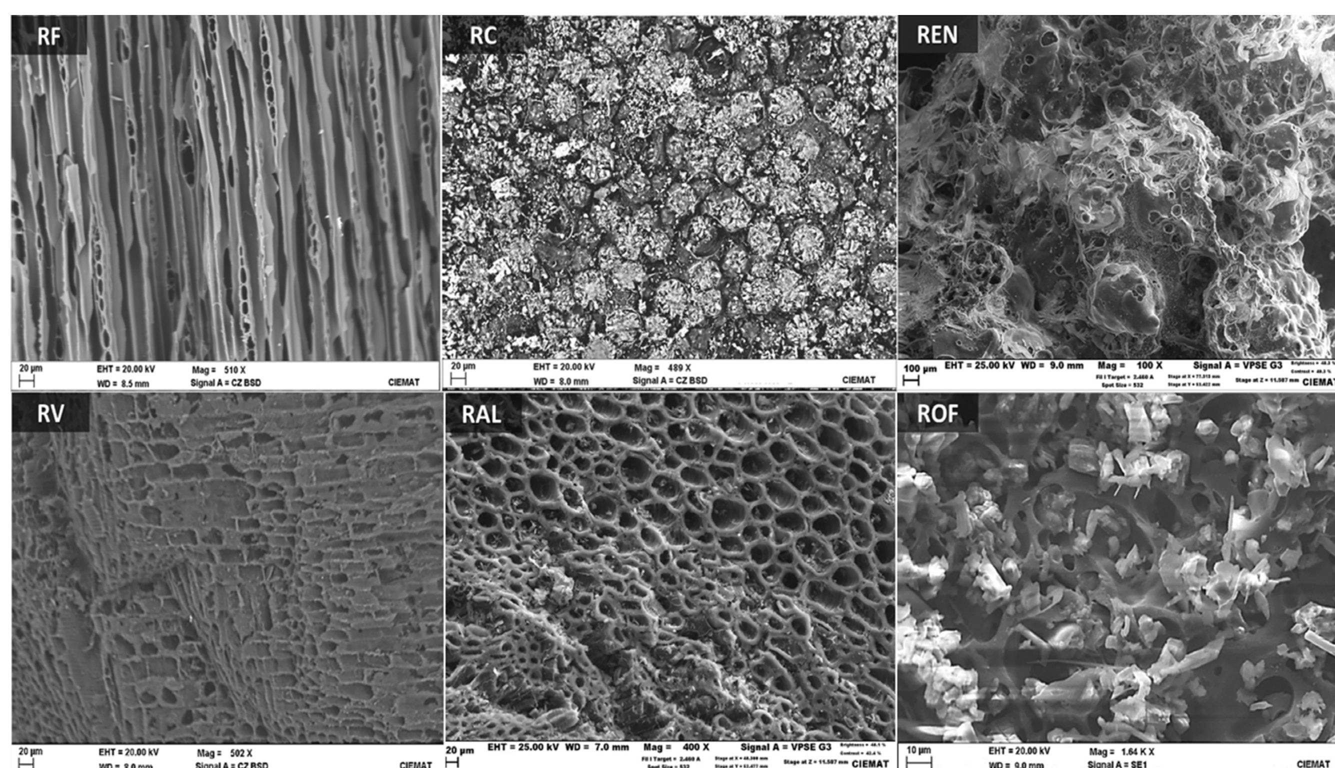


Figura 5. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de biocarbones producidos a partir de residuos de procedencia: forestal (RF), plantas suculentas (RC), planta de biomasa (REN), viticultura (RV), cereal de regadío (RAL) e industria oleícola (ROF). Imágenes tomadas por R. Saldaña (Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos. CIEMAT).

suculentas desarrollan adaptaciones para la acumulación de sales en medios áridos o salinos (Uhlig, 2017). Los biocarbones de origen agrícola son los siguientes en presentar mayor concentración en iones; la variabilidad y sus concentraciones dependerán de la especie, el suelo en el que se desarrolle, el clima y la época de cosecha (Brown, 2009). Por último, los de origen leñoso tienen los valores más bajos, lo que se relaciona con el alto contenido en C y bajo en nutrientes (Sohi *et al.*, 2009).

Prueba de fitotoxicidad

Un factor clave en la caracterización de los biocarbones es evaluar su potencial de toxicidad. Se propone en este estudio emplear para ello el test de Zucconi (Zucconi *et al.*, 1985) utilizado habitualmente para evaluar la

fitotoxicidad del compost. El test valora el porcentaje de germinación y la longitud de crecimiento de raíces, de manera que una inhibición de la germinación indicará altos niveles de fitotoxicidad, mientras que la observación de limitaciones en el crecimiento radicular puede asociarse a fitotoxicidad moderada. La especie vegetal usada para estos ensayos fue el berro (*Lepidium sativum*).

La evaluación de los resultados mostró que la mayoría no presentaban indicios de fitotoxicidad, con una tasa de germinación y crecimiento radicular óptimo, con tres excepciones: el biochar de REN, que presentó una fitotoxicidad moderada, y ROF y RC, que presentaron elevados niveles de fitotoxicidad. Los tres casos se asocian a altos valores de conductividad eléctrica. Los altos niveles de fitotoxicidad no implican necesariamente riesgo ambiental en la adición de biochar a los suelos, simplemente que es necesario hacer ensayos de dosis o estudios más en profundidad para conocer su comportamiento una vez se incorpore al suelo, y de cómo puede afectar a las especies vegetales.

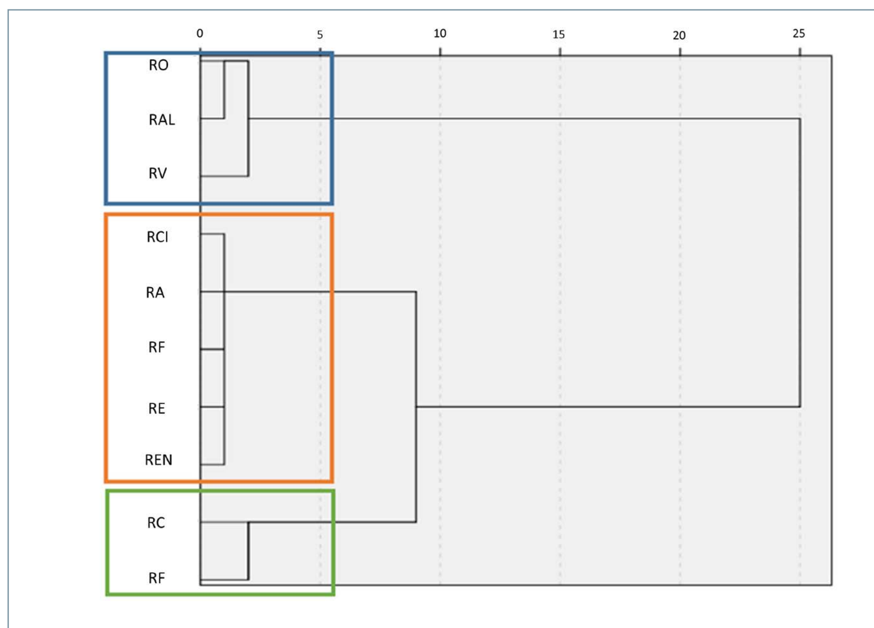


Figura 6. Dendrograma resultante del análisis de conglomerados en muestras de biocarbones.

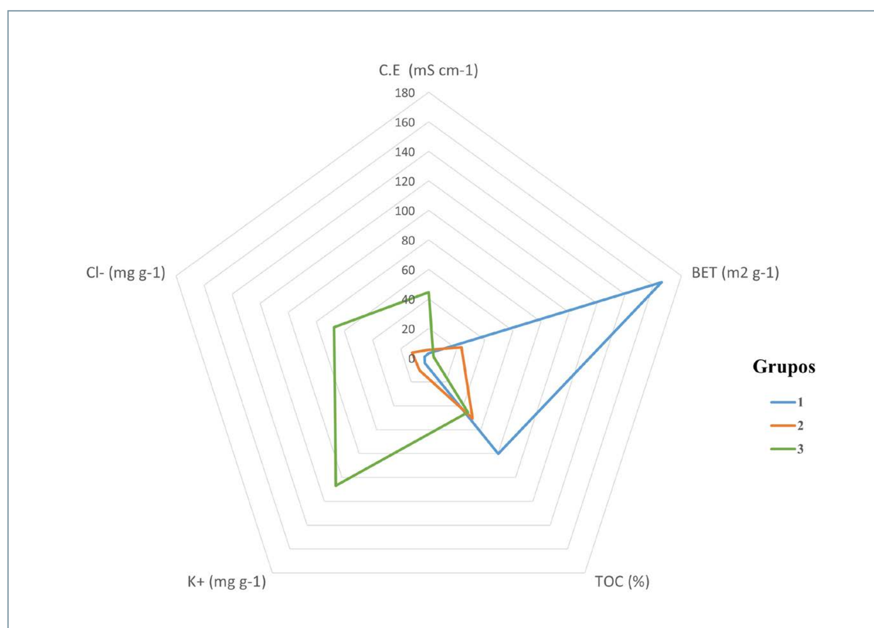


Figura 7. Representación de las variables más discriminantes de cada una de las agrupaciones.

Análisis de microestructura: SEM

La microscopía electrónica de barrido (SEM) permite observar las estructuras resultantes tras el proceso de pirólisis. En la figura 5, se encuentran 6 de las 10 muestras de los biocarbones de estudio; la heterogeneidad del origen de los residuos se mantiene en su versión carbonosa. Son formas complejas en las que, dependiendo de la materia prima, se mantendrá en mayor o menor medida la estructura original. La abundancia de compuestos más resistentes como las ligninas contribuirán a mantener la estructura original; en tanto que compuestos más lábiles, favorecerán un reordenamiento de las estructuras del biochar con respecto a las de la materia prima.

En el caso de las muestras RF y RV, procedentes de especies leñosas, se mantienen las fibras de las estructuras del parénquima. RAL también presenta muy definida una pared llena de concavidades, mantenida de la biomasa original. Esta disposición indica un predominio de macroporos (>50 nm) (Downie *et al*., 2009), que pueden ser potenciales reservorios de agua u otras sustancias que puedan quedar almacenadas, así como microhábitats para organismos presentes en los suelos. Esto, además, coincide con que RV y RAL mostraban los valores más altos de superficie específica.

Las tres imágenes restantes muestran una configuración distinta a las anteriormente comentadas. Los biocarbones RC y ROF destacan por presentar abundantes cristales en la superficie de la estructura, correspondientes a las sales precipitadas, responsables de los altos valores en conductividad e iones solubles (tablas 1 y 2). Se intuye la estructura original de los residuos vegetales; en el caso de RC con formas globulares, mientras que en ROF, una estructura constituida por oquedades irregulares, posiblemente restos de las estructuras parenquimáticas. Es posible que parte de las estructuras hayan sufrido algún proceso de fusión, tapando algunos de los poros de la estructura original. La muestra de biochar REN tiene una disposición más compleja al no tener

estructura heredada del residuo, sino que presenta una forma masiva. Su color blanquecino indica un recubrimiento de sales acorde con su caracterización química.

Agrupaciones de biocarbones y sus aplicaciones potenciales en los suelos

A partir de la caracterización de cada uno de los biocarbones, se planteó conocer si residuos de distinto origen, sometidos a las mismas condiciones de pirólisis, podrían ser agrupados de acuerdo con sus usos potenciales. Para ello, se realizó una serie de análisis estadísticos. En primer lugar, un análisis de conglomerados representado en dendrograma (figura 6) con los grupos que se pueden formar a raíz de las características principales de los biocarbones. Posteriormente, se procedió a realizar un análisis discriminante que indicó qué variables diferenciaban de forma significativa dichos grupos.

El resultado del análisis de conglomerados muestra como los 10 tipos de biochar se pueden categorizar en 3 grupos distintos:

- Grupo 1: RO, RV y RAL.
- Grupo 2: RF, RCI, REN, RE y RA.
- Grupo 3: ROF y RC.

Y el análisis discriminante indica que las variables que establecen mayores diferencias entre los tres grupos son la conductividad eléctrica (asociada a la salinidad), la superficie específica y el contenido en ion K^+, seguidos del carbono orgánico total y el ion Cl^-.

La distribución (figura 7) de las variables más destacadas para cada uno de los conglomerados o agrupaciones muestra indicios de sus posibles aplicaciones.

Como se observa en las agrupaciones, el origen de las materias primas no permite estandarizar a priori una serie de parámetros o características, sino que han de tener que ser evaluadas de forma individual o, al menos, por tipologías más específicas.

En cuanto a las ventajas que el uso de estos biocarbones puede aportar a los suelos, destaca una característica general, su alcalinidad, como medio para incrementar el pH de suelos ácidos, lo que favorece la actividad biológica, la disponibilidad de determinados nutrientes y, con ello, una mayor diversidad de posibles usos agrícolas. Asimismo, se debe tener en cuenta el papel que pueden tener estos biocarbones mejorando la estructura del suelo. Estructuras bien definidas como las observadas en el SEM pueden favorecer hábitats potenciales para diversos tipos de microorganismos.

El grupo 1 está compuesto por residuos de origen agrario y agroalimentario. Destacan por sus elevados niveles de superficie específica y carbono orgánico total (TOC). Su alta superficie específica puede ser muy interesante a la hora de incorporarlos a suelos degradados, sobre todo aquellos en condiciones climáticas áridas, al contribuir a la retención de agua y su disponibilidad para la vegetación. A su vez, la aplicación combinada junto con fertilizantes, en climas más húmedos, permitirá dosificarlos, evitando pérdidas por lixiviación, optimizando su uso y dosis, y reduciendo costes. De igual modo, son aplicables en procesos de descontaminación, para retener contaminantes de la fracción soluble reduciendo su (bio) disponibilidad para las plantas.

La elevada recalcitrancia, que supone estabilidad a largo plazo, de parte del C correspondiente al TOC, es de gran interés para incrementar el potencial de los suelos como sumideros de carbono, lo que favorece la reducción de gases de efecto invernadero.

El grupo 2 es el más numeroso, constituido por biocarbones de orígenes más diversos y que, como se observa en la figura 7, no destacan en ninguno de los parámetros. Muestran una gran versatilidad de aplicaciones, como las anteriormente comentadas, aunque con un impacto más moderado. Son aptos para incrementar el carbono en los suelos y, además, como se describía en el apartado de resultados, aquellos con los valores más altos en nitrógeno o silicio, se encuentran en este grupo, por lo que podrían tener interés para el incremento de estos nutrientes.

Por último, el grupo 3 es el más singular por la elevada concentración en sales. Su uso deberá estar bien testado en cuanto a las dosis que aplicar y las características del suelo, para determinar cómo puede afectar a los cultivos. En climas secos, este grupo puede ser aplicable en cultivos adaptados a elevada salinidad; en climas húmedos cabe esperar un rápido lavado de las sales; asimismo, su alto contenido en K^+ podría ser favorable en cultivos con altos requerimientos en este elemento, como los cítricos (Opazo y Razeto, 2001), y así reducir el uso de fertilizantes con este nutriente. En todos los casos, ha de tratarse de suelos con buenas condiciones de drenaje que eviten un incremento de la salinidad.

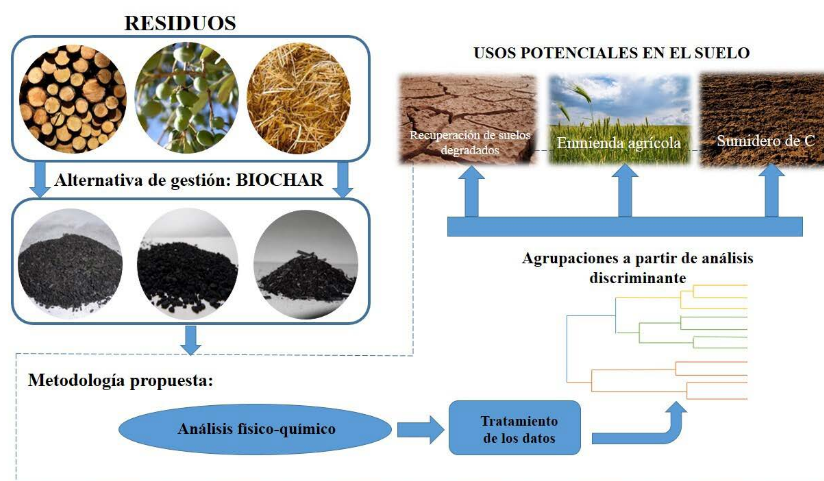
Todas estas aplicaciones son posibles usos potenciales basados en las características recogidas en cada grupo. Antes de aplicarse en escenarios reales, deben someterse a ensayos preliminares a escala piloto para conocer la respuesta específica de suelos y cultivos.

La diversidad de residuos que se producen, incluso en limitados ámbitos geográficos como en el que se ha desarrollado este estudio, sugiere seguir investigando para detectar patrones de agrupación y precisar sus usos. En este sentido, se debe reforzar la idea de que incluso áreas geográficamente muy limitadas pueden ofrecer una amplia variedad de residuos susceptibles de pirólisis, lo que reduce la huella de carbono asociada a su transporte, además de favorecer la economía local y promover la economía circular. Un buen conocimiento de las características del residuo y el producto carbonoso obtenido a partir de él puede generar valor añadido si, además, es aplicado en las proximidades, cubriendo necesidades de sus suelos, en particular las relacionadas con la mejora de la fertilidad y el contenido en materia orgánica. Por otro lado, la heterogeneidad de los residuos susceptibles de pirólisis hace que se puedan obtener en muy distintas áreas geográficas, sin competir con otros posibles usos de dichos residuos.

Por último, para poder extender el uso de biocarbones, es necesario el desarrollo de un marco legal específico que concrete estándares en la producción de biochar y en los parámetros físico-químicos resultantes que permita su uso con suficientes garantías.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran cómo biocarbones procedentes de residuos sometidos a una pirólisis de alta temperatura presentan propiedades



muy heterogéneas, de alto interés agrícola y ambiental.

La naturaleza de la materia prima ha sido determinante en las propiedades de los biocarbones, tanto físico-químicas como estructurales.

De los 10 biocarbones estudiados, los parámetros discriminantes para la formación de los grupos han sido: la conductividad eléctrica, la superficie específica y los iones cloruro y potasio.

La evaluación de dichas propiedades se ha llevado a cabo mediante una metodología específica que ha permitido asociar biocarbones, de muy diverso origen, según su capacidad para ofrecer servicios agrícolas y ambientales.

Finalmente, el hecho de que puedan agruparse al compartir características físico-químicas favorece menores limitaciones en la disponibilidad de los residuos, por ejemplo, debido a su posible estacionalidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible por la cofinanciación de los proyectos INTENSE (European ERANet FACCE Surplus Programme (ID: 652515)) y REHABILITA (CTM2016-78222-C2-2-R). Los autores también agradecen a Raúl Saldaña Campanario la toma de las imágenes del SEM y el apoyo en determinaciones físico-químicas junto con Andrés Torres Ruiz.

Referencias bibliográficas

Abbas T., Muhammad R., Ali S., Zia-ur-Rehman M., Farooq M., Abbas F., Hannan F., Fakhir H., Rinklebe J., Sik Y. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum L.*) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 140:37-47.

Al-Wabel M. I., Al-Omran A., El-Naggar A. H., Nadeem M., Usman A. R. (2013). Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology.* 131:374-379.

Beesley L., Moreno-Jiménez E., Fellet G., Carrijo L., Sizmur T. (2015). *Biochar and heavy metals.* In: Lehmann, J. and Joseph, S. (Eds.). Biochar for environmental management: Science, Technology and Implementation. Earthscan, London: 563-594.

Brown R. (2009). *Biochar production technology.* En: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London: 127-146.

De Luca T. H., MacKenzie M., Gundale M. J. (2009). *Biochar effects on soil nutrient transformations.* En: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London: 12-35.

Demirbas A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* 72(2): 243–248.

Diatta A. A., Fike J. H., Battaglia M. L., Galbraith J. M., Baig M. B. (2020). Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geosciences, 13*(14).

Downie A., Crosky A., Munroe P. (2009). *Physical properties of Biochar.* En: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London: 13-30.

Gaskin J., Steiner C., Harris K., Das K., Bibens B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51: 2061-2069.

Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. (2001). The "Terra Preta" phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften,* 88: 37-41.

Hammes K., Schmidt M. W. I. (2009). *Changes of Biochar in Soil.* En: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London: 12-35.

Hammond J., Hans-Peter S., Van Scholl L., Ruysschaert G., Nelissen V., Ibarrola R., O'Toole A., Shackley S., Van Laer T. (2016). *The legality of biochar use. Regulatory requirements and risk assessment.* En: Shackley A., Ruysschaert G., Zwart K., Glaser B. (Eds.) Biochar in European soils and agriculture: Science and Practice. London: Earthscan. Routledge: 227-252.

IPCC (2018). Chapter 4 - Strengthening and implementing the global response. En: Global warming of 1.5°C. 313–443. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/11/SR15_Chapter4_Low_Res.pdf (Consultado el 25 de marzo de 2020).

Jeffery S., Bezemer T. M., Cornelissen G., Kuyper T. W., Lehmann J., Mommer L., Sohi S., Van de Voorder T. F. J., Wardle D. A., Van Groenigen J. W. (2015). The way forward in biochar research: Targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenergy.* 7(1): 1-13.

Knicker H. (2010). "Black nitrogen"–an important fraction in determining the recalcitrance of charcoal. *Organic Geochemistry. 41*: 947–950.

Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstand J. O., Thies J., Luizao F. J., Petersen J., Neves E. G. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal, 70*(5): 1719-1730.

Lua A. C., Yang T., Guo J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of active carbons prepared from pistachio-nut shells. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 72: 279-287.

Meyer S., Genesio L., Vogel I., Schmidt H. P., Soja G., Someus E., Shackley S., Verhjeijen, F. G. A., Glaser B (2017). Biochar standardization and legislation harmonization. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 25*(2): 175-191.

Opazo A. J. D., Razeto M. B. (2001). Efecto de diferentes fertilizantes potásicos en el contenido foliar de nutrientes, producción y calidad de fruta en naranjo cv. Valencia. *Agricultura Técnica, 61* (4): 470-478.

Pourhashem G., Yu Hung S., Kenneth B. M., Masiello C.A (2018). Policy support for biochar: Review and recommendations. *Global Change Biology Bionergy* 11: 364-380.

Red Española de Compostaje (REC) (2014). *Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otra biomoléculas III.8.* Mundi-Prensa, Madrid. ISBN 9788484766926

Saletnik B, Zagula G, Bajcar M, Tarapatskyy M, Bobula G., Puchalski C. (2019) Biochar as a Multifunctional Component of the Environment–A Review. *Appl. Sci.* 9 (6):1139.

Schmidt H. P. (2012). 55 Uses of Biochar. *Ithaka Journal* 1/2012: 286-289.

Sohi S., Lopez-Capel E., Krull E., Roland B. (2009). Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. *CSIRO*. Rep. No. 05/09: 64.

Turner J. A. (1999). A realizable renewable energy future. *Science* 28: 687-689.

Uhlig M (2017). *Cactus y otras suculentas.* Ediciones Hispano Europea.

Wang M., Wang J. J., Wang X. (2018). Effect of KOH-enhanced biochar on increasing soil plant-available silicon. *Geoderma* 321: 22-31.

Ye L., Camps-Arbestain M., Shen Q., Lehmann J., Singh B., Sabir M. (2020). Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management,* 36(1): 2-18.

Zucconi F., Monaco A., Forte M., De Bertoldi M. (1985) *Phytotoxins during the stabilization of organic matter.* En: Composting of Agricultural and other Wastes, ed. J. K. R. Gasser. Elsevier Applied Science Publishers, London & New York: 73-85.